

学校编码: 10384

密级_____

学号: 22320131151369

厦门大学

硕士学位论文

福建沿岸海浪漫堤预警研究

The Research of Sea Wave Overflow Forecast
along Fujian Coast

张敬

指导教师姓名: 商少平 教授

专业名称: 物理海洋学

论文提交日期: 2016年05月

论文答辩时间: 2016年05月

2016年05月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文(包括纸质版和电子版)，允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

()1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于
年 月 日解密，解密后适用上述授权。

()2.不保密，适用上述授权。

(请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。)

声明人(签名)：

年 月

目 录	
摘 要.....	I
Abstract.....	III
第一章 绪 论	1
1.1 研究背景和选题依据.....	1
1.2 海浪模拟的国内外研究综述.....	1
1.2.1 国外海浪模型研究综述.....	2
1.2.2 国内的波浪模式研究综述.....	4
1.2.3 福建沿岸及台湾海峡海浪模拟的研究.....	5
1.3 波浪爬高研究简介.....	6
1.4 海浪漫堤预警研究简介.....	7
1.5 本文的研究内容和技术路线.....	8
第二章 福建沿岸海浪数值预报模型	10
2.1 SWAN 模型	10
2.1.1 SWAN 模型控制方程	10
2.1.2 物理过程.....	11
2.1.3 数值实现.....	18
2.1.4 源项处理.....	20
2.2 两种网格下 SWAN 模型模拟的台湾海峡有效波高的比较	20
2.2.1 台湾海峡地理概况.....	21
2.2.2 计算网格.....	23
2.2.3 2013 年两场台风期间有效波高的模拟.....	26
2.3 本章小结	33
第三章 福建沿岸波浪爬高的预报方案	35
3.1 波浪爬高公式.....	35
3.2 波长与波高的相关性数值实验.....	37
第四章 福建沿岸 A 海堤海浪漫堤预警方案	41

4.1 A 海堤海浪漫堤预警方案	41
4.2 “天兔”台风期间 A 海堤天文潮-风暴潮耦合水位 $H_{耦合水位}$ 的后报	41
4.3 “天兔”台风期间 A 海堤波浪爬高 $R_{1\%}$ 的后报	42
4.4 “天兔”台风期间 A 海堤波浪爬高所及高程 $H_{高程}$ 的后报	43
4.5 本章小结	43
第五章 总 结	45
5.1 研究结论	45
5.2 本预警方案的独到之处	46
5.3 展望	46
参考文献	47
致 谢	52

Contents

Abstract (Chinese)	I
Abstract (English)	III
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research background and purpose	1
1.2 Review of the wave studies	1
1.2.1 Wave studies in foreign	2
1.2.2 Wave studies in China	4
1.2.3 Wave simulation research in Fujian Coast and Taiwan Strait.....	5
1.3 Review of the wave run-up studies	6
1.4 Review of sea wave overflow forecast studies	7
1.5 Contents of paper and technology roadmap	8
Chapter 2 Numerical forecast model of sea wave along Fujian Coast	10
2.1 SWAN model	10
2.1.1 Basic model equation.....	10
2.1.2 Physical process and source.....	11
2.1.3 Experimentation of simulation	18
2.1.4 Source and sinks in the paper	20
2.2 Comparison of ocean wave simulation with SWAN wave model using two kinds of computational grids in the Taiwan Strait	20
2.2.1 Geographical profile of Taiwan Strait	21
2.2.2 Model grids	23
2.2.3 Simulation of significant wave height during two typhoons in 2013	26
2.3 Summary	33
Chapter 3 Forecast scheme of wave run-up along Fujian Coast	35
3.1 Formula of wave run-up	35

3.2 Numerical experiment of wave length and wave height	37
Chapter 4 Overflow forecast scheme for Fujian Coast A seawall	41
4.1 Overflow forecast scheme of A seawall.....	41
4.2 The hindcasting of astronomic tide coupled storm surge elevation	
$H_{\text{coupled level}}$ of A seawall at Typhoon Usagi	41
4.3 The hindcasting of wave run-up $R_{1\%}$ of A seawall at Typhoon Usagi	42
4.4 The hindcasting of wave run-up elevation $H_{\text{elevation}}$ of A seawall at	
Typhoon Usagi.....	43
4.5 Summary	43
Chapter 5 Summary	45
5.1 Research conclusions.....	45
5.2 The special about this forecast scheme.....	46
5.3 Outlook.....	46
References	47
Acknowledgements	52

摘 要

本文利用第三代海浪模式 SWAN 基于非结构三角形网格和矩形网格分别对 1319 号“天兔”、1323 号“菲特”两场台风影响下的福建沿岸有效波高进行了数值模拟。其中，福建中部 A 海堤的三角形网格模拟的平均绝对误差分别为 0.15 m、0.16 m，而矩形网格的平均绝对误差分别为 0.23 m、0.22 m；三角形网格模拟的均方根误差分别为 0.19 m、0.20 m，而矩形网格的均方根误差分别为 0.26 m、0.28 m，说明两种网格的模拟值与实测值较吻合。然而三角形网格的模拟效果更好一些。这说明，本文建立的基于精细化三角形网格的福建沿岸海浪数值模型可作为预报模型用于业务预报。

有了海浪数值预报模型，本文进而建立了福建中部 A 海堤海浪漫堤预警方案。实施海堤海浪漫堤预警时，预报员所要做的就是对波浪爬高所及高程 $H_{\text{高程}}$ 进行实时预报。波浪爬高所及高程 $H_{\text{高程}}$ 为天文潮-风暴潮耦合水位 $H_{\text{耦合水位}}$ 和 1%大波爬高 $R_{1\%}$ 之和。其中，耦合水位由厦门大学海洋与地球学院海洋遥感与数值模拟实验室建立的模型预报；1%大波爬高 $R_{1\%}$ 由波浪爬高计算公式预报。

在进行波浪爬高预报时，必须先预报 1%大波波高 $H_{1\%}$ 和大波波高对应的波长 $L_{1\%}$ 。SWAN 模型只预报有效波高 H_s 和其所对应波长 L_s ，而不能预报 $H_{1\%}$ 和 $L_{1\%}$ 。根据海浪的经验统计关系式 $H_{1\%} = 1.61 * H_s$ ，人们可由 H_s 计算出 $H_{1\%}$ 。然而 $L_{1\%}$ 的预报值仍然无法获得。为了能够预报 $L_{1\%}$ ，本文利用 SWAN 模型进行波长和波高的相关性数值实验，得到了相关系数高达 0.94 的波长与波高的相关关系式，从而解决了无法预报 $L_{1\%}$ 的难题。

建立了 A 海堤海浪漫堤预报方案之后，本文将其用于对“天兔”台风期间 A 海堤的海浪爬高所及高程进行了后报检验。由后报检验结果可见，“天兔”台风期间 A 海堤的波浪爬高所及高程后报值与实测值之间的平均绝对误差为 0.24 m，二者较为符合，而且后报的 9 月 22 日 15 时和 16 时出现的波浪爬高所及高程大于 6 m (A 海堤的堤顶高程为 6 m)，这与台风期间 A 海堤漫堤的事实相一致。

福建中部 A 海堤海浪漫堤预警的后报结果表明该海堤海浪漫堤预警方案是可行的。此方案可供福建沿岸其他海堤建立海浪漫堤预警方案时参考。

关键词：SWAN 模式；台湾海峡；有效波高；波浪爬高；漫堤预警

厦门大学博士论文摘要库

Abstract

In this paper, the third generation wave model SWAN which is based on unstructured triangular and rectangular mesh is used to simulate respectively the significant wave height during 2 typhoons (1319 Usagi and 1323 Fitow) along Fujian Coast. For A seawall lay on Central Fujian, the *MAE* of triangular mesh modeling are 0.15 m and 0.16 m respectively, while the *MAE* of rectangular mesh modeling are 0.23 m and 0.22 m respectively; the *RMSE* of triangular mesh modeling are 0.19 m and 0.20 m respectively, while the *RMSE* of rectangular mesh modeling are 0.26 m and 0.28 m respectively, which shows that the simulated data of the two meshes match well with measured data. However, the results of triangular mesh modeling is better. It shows that the sea wave numerical model along Fujian Coast based on refined triangular mesh that we established can be the model to forecast.

After having sea wave numerical forecast model, we established the scheme of sea wave overflow forecast about A seawall. When carrying out seawall overflow forecast, what the forecaster needs to do is forecasting the wave run-up elevation timely. Wave run-up elevation is the sum of astronomical tide and storm surge coupled water level and one percent wave run-up elevation. Astronomical tide and storm surge coupled level are forecasted by marine remote sensing and numerical simulation laboratory College of Ocean and Earth Sciences in Xiamen University, one percent wave run-up elevation is forecasted by wave run-up calculating formula.

We have to forecast one percent wave height $H_{1\%}$ and its corresponding wavelength $L_{1\%}$ when forecast wave run-up. While SWAN model can only output significant wave height H_s and corresponding wavelength L_s . We can get one percent wave height by using the empirical statistical relation formula $H_{1\%} = 1.61 * H_s$, however, one percent wavelength $L_{1\%}$ still cannot be got. To forecast one percent wavelength $L_{1\%}$, obtain the relationship of wavelength and wave height, solve the problem of one percent wavelength missing by using the SWAN model numerical experiment between wavelength and wave height.

After establishing A seawall overflow forecast scheme, we applied it to handcast

test about wave run-up elevation at Typhoon Usagi. It shows that the *MAE* of wave run-up elevation is 0.24 m, moreover, simulated wave run-up elevation at 15 and 16 o'clock on September 22th are greater than 6 m (the crest level of A seawall is 6 m), this is consistent with the fact of A seawall overflow.

The result of sea overflow forecast of A seawall on Central Fujian Coast indicates the hind casting test of overtopping is viable. This scheme can provide a reference for the schemes of other seawalls on Fujian Coast.

Key Words: SWAN model; Taiwan Strait; significant wave height; wave run-up; overflow forecast

第一章 绪论

1.1 研究背景和选题依据

海浪是发生在海洋中的一种波动现象，在海洋动力环境和海-气相互作用等领域具有重要地位，是指由风产生的海面波动，其周期为0.5~25 s，波长为几十厘米到几百米，波高为几厘米到十几米，在罕见的情况下波高可以达到30 m以上。波浪由深海向浅海传播，进入海湾及其近岸水域，受海底地形、岛屿、港口、建筑物、岸形的制约，加上各种流场、风应力、底摩擦等动力因素的影响，会造成波浪的浅水变形、折射、反射、绕射、波浪破碎等现象。

近代研究表明^[1-3]，海上自然破坏力仅有10%直接来源于风，其余90%都是来自于浪，其中灾害性台风浪的破坏力尤为巨大，每年由海浪造成直接经济损失达数亿元。

台湾海峡位于我国东南沿海，位于西北太平洋台风主要路径上，受台风影响频繁，加上海峡对风的峡管效应，成为受风暴潮和台风浪灾害较为严重的海区。福建省地处台湾海峡西岸，海岸线曲折绵长，形成了众多港湾，主要有三沙湾、罗源湾、兴化湾、泉州湾、厦门湾、东山湾等。一方面为经济的发展提供了有利条件，另一方面也使福建省成为海洋灾害的频发区。台风期间，狂风引起的巨浪不仅会对沿海的海堤、码头、各类建筑物造成破坏，而且会给沿海城市的供电、供水、防洪、排涝工作带来巨大的影响，并给海水养殖、农业、交通运输业等相关产业造成重大的经济损失，严重时甚至危及人民的生命财产安全。因此，对于海浪进行研究和实施准确的预报，直接关系到沿海城市和岛屿的发展，对灾害的防御和海洋资源的开发利用具有重要的现实意义和经济价值。

海堤是保护沿海地区免遭浪、潮袭击修建的重要工程设施，海堤的破坏将导致严重的后果。尤其是台风期间，台风浪极易引起海水漫堤，其危害甚至致使堤岸溃决、农作物受淹，若海堤出现溃决，海水的影响还将是长期的。

基于此，本文建立了福建沿岸海浪漫堤预警方案。

1.2 海浪模拟的国内外研究综述

海浪在近岸传播时,受到地形和海岸工程建筑物等的影响,会产生浅化、折射、绕射、反射和破碎等现象,从而使波浪的特征参数发生变化。近岸附近的波浪破碎是产生近岸流的重要原因,也是影响近岸泥沙运输、海岸变形和污染物输移的重要海洋动力因素,同时,波浪也是海岸工程中需要考虑的重要因素。因此,对海浪进行模拟研究具有重要的现实意义。

1.2.1 国外海浪模型研究综述

近年来,经过长期的研究和实践,以海洋学、数学与流体力学为基础,国内外学者提出了很多海浪数值计算模式,在应用时可以根据不同的需要选择合适的模型来模拟波浪的运动,除了经验统计模型,目前应用比较广泛的海浪模式大致可以分为三种类型。

(1) Boussinesq方程模型

Boussinesq方程的出现最早可以追溯到1871年^[4],它是Boussinesq研究浅水非线性波在平底传播时的色散效应而推导出的方程。Peregrine在1967年把这个方程推广到波浪在变水深传播时的情况,从而得出了经典的Boussinesq方程^[5]。此后通过对其色散性和非线性的不断改进,逐渐形成了Boussinesq类方程。此类模型是直接描述海浪波动过程中水质点的运动,Boussinesq方程为质量守恒的连续方程和不可压无粘流体的动量方程,Boussinesq方程将三维波动问题转化为二维问题,使得问题的处理得到简化,Boussinesq方程用流速与水位描述水体变化,任何运动都要保持质量和动量守恒。因此,该方程能够反映波浪运动的各种变形,如折射、绕射、反射以及波浪之间的相互作用。

然而,由于Boussinesq方程模型的空间步长以及时间步长受到模拟海浪的周期和波长的限制,所以,对于近岸区域范围较大以及时间较长的数值模拟计算,其计算量将相当庞大,这使得Boussinesq方程的应用受到很大的限制^[6]。

(2) 缓坡方程模型

1974年荷兰学者Berhoff在线性缓坡假设条件下利用摄动法推导出了二阶椭圆型偏微分方程^[7],该方程被称为缓坡方程,它综合考虑了波浪的折射和绕射。缓坡方程提出后,吸引了很多海岸工作者对它进行了很多大量的研究,包括方程

的改进,新的求解方法的提出,工程中的实际应用等。

缓坡方程最初的形式为椭圆型,需要在计算域的全部边界上给出边界条件,并在计算域内求解,对计算机的内存和计算速度要求较高,因而限制了它的应用。随后,许多学者对方程本身和求解方法等各方面进行了简化,主要的简化形式有:双曲线的缓坡方程^[8]、抛物线的缓坡方程^[9]、Helmholtz型的缓坡方程^[10]、RCPWAVE型的缓坡方程^[11]等,但是方程形式的简化,在一定程度上要忽略某些物理过程,这就使得缓坡方程的使用会受到一定的限制。

(3) 动谱平衡方程模型

动谱平衡方程^[12],是根据能量守恒理论,通过在方程中加入不同的源函数,并考虑各种复杂的物理过程,简化波浪场的动力过程,使得该方程模型能够较好的应用于研究海域的海浪数值模拟。动谱平衡方程的研究主要是针对源项中的物理过程进行相关的改进,基于动谱平衡方程的数值计算模式已经由第一代发展到了第三代。

第一代海浪数值模式是在Gelci的工作小组做了大量基于动谱能量平衡方程的开创性工作的基础上发展出来的,由于计算简单,曾被许多地区广泛应用,但是由于模型的源项忽略了非线性相互作用,只考虑了风能输入和白浪耗散,使得波浪成长达到充分状态后突然停止,对波浪成长的描述不够准确,从而对复杂地形或者气象环境复杂的海区适用性比较差。

1968年,Mitsuyasu首先在观测中发现Phillips谱的系数随风区变化的现象。1973年,Hasselmann利用联合北海海浪观测计划中的观测资料分析Phillips谱的系数随风区变化的规律。基于Mitsuyasu和Hasselmann等人通过风输入波浪能量的直接观测结果和波浪成长实验改变了波能量平衡观点,使得第二代海浪模式逐渐发展起来,相比于第一代模式,第二代海浪模式中加入了四相波-波相互作用。该模式已经能较为合理的模拟出大部分天气下的波浪,但是由于采用经验的成长关系和简化的谱形进行模拟,对快速变化风场下的波浪模拟效果不好。

1978年在邦多勒(Bandol)举行了北大西洋公约组织(NATO, North Atlantic Treaty Organization)海气相互作用会议,在会议上提出了SWAMP(Sea Wave Model intercomparison Project)计划,试图开发出物理过程考虑更全面、适用性更强的海浪数值模式。在1985年发表的论文中,该计划比较了9个第一代和第二代海浪模

式,通过系统分析,SWAMP认为,第一代海浪模式没有考虑波浪的非线性相互作用,而且高估了风能输入和白浪破碎效应;第二代海浪模式运用参数化形式近似表示海浪的非线性相互作用,虽然提高了模型的性能,但是在能量传递机制处理上仍有缺陷,不能模拟突变风场下形成的波浪。1984年,Hasselmann邀请一些海浪模拟专家学者举行了汉堡会议,联合一些西欧国家的研究人员成立了WAM (Wave Modeling Group)科研小组。该科研小组在事先不对谱做任何假设,直接参数化所有的源项,采用DIA (Discrete Interaction Approximation)算法^[13]估算非线性相互作用,并在此基础上开发了第三代海浪模式WAM。WAM模型充分考虑了水深变化、障碍物对波浪成长和传播的影响,并且合理的描述了风能输入、白浪破碎、摩擦效应和波-波相互作用等物理过程。但是模型不能反映波浪的绕射、折射效应,不能提高复杂地形海区的计算精度。

基于WAM模型,第三代海浪模式得到了进一步的发展,例如美国NOAA/NECP海洋模拟小组基于WAVEWATCH I和WAVEWATCH II,开发了一个全谱空间的海浪模式WAVEWATCH III^[14]。WAVEWATCH III主要适用于全球尺度的波浪计算,对于近岸浅水效应较明显的区域计算精度不是很高。区别于适用于全球尺度波浪计算的WAM模型和WAVEWATCH模型,荷兰Delft大学Ris等总结历年来关于波浪能量输入、耗散等相关的研究成果,开发的海浪模式SWAN (Simulating Wave Nearshore)全面考虑了波浪产生、成长和传播过程中的各项物理过程,包括三相波-波相互作用和四相波-波相互作用,并且合理的加入了波浪的浅水变形效应,相比于其他模式,更适用于于海岸、湖泊和河口地区。同时SWAN模型采用了全隐式的有限差分格式,无条件稳定,使得时间步长和计算网格不受其他条件的限制^[15, 16]。

迄今为止,第三代浅水波浪模型SWAN经过多年的改进,已经逐渐趋于成熟,在许多地形相对复杂的水域如海岸、湖泊、河口等得到了广泛的应用,并且结果显示了模型的可行性、合理性^[12, 17-19]。

1.2.2 国内的波浪模式研究综述

在海浪模式的开发方面,国内学者也取得了很多研究成果,60年代初,文圣常^[20]将能量方法和谱方法结合起来,发展成一种由风计算浪的方法,应用较简便,

精度较高,被国家港口工程技术规范采用。90年代末,文圣常等^[21]针对国外盛行的第三代模式中方法存在的困难,提出一种新型混合预报模式,将控制方程中能量的获取、耗散、非线性波-波相互作用等物理过程合并为一项,然后通过可靠的风浪成长关系导出,避免逐项处理难于计算的能量和耗散问题,此模式运转稳定,精度有保证,计算时间比第三代海浪计算模式小一个量级,被国家海洋预报台采用。国家海洋局第一海洋研究所的地球流体力学研究室袁业立等^[22, 23]根据我国的实际海况特点和可能的计算能力,基于第三代海浪模式的优缺点,发展了一种直接模拟海浪波数谱的LAGFD-WAM海浪数值模式。尹宝树等^[24]提出的YW-SWP海浪数值预报模式考虑了地形引起的折射效应和波-波间非线性能量转移,采用了新的风输入源函数和文氏理论风浪谱,计算时风场采用一种加权平均处理技术,使模式更适合我国海区。

在海浪模式应用于台风浪数值计算方面,李燕^[25]利用第三代波浪数值模式SWAN计算了黄渤海海域的有效波高,结果显示波高增强或者减弱的趋势能很好的反映出来。梅婵娟等^[26]利用WAVEWATCH和SWAN模式,分别对黄海区域进行了理想状态下的模拟计算和实际浪场的模拟计算,结果表明:理想状态下两种模式的模拟结果在大小和空间分布都不相同,但在大小及其变化趋势上相差不大,实际模拟中,将两种模式的模拟结果与实际观测值相比,发现SWAN模式结果较WAVEWATCH模式好。邱桔斐等^[27]采用MIKE21的SW (Spectral Wave model)模块,选用“麦莎”台风和2006年1月的一次冷空气,对不同极端天气系统下长江口外海域的波浪场进行模拟,计算结果与实测值吻合较好,分析结果说明不同天气系统下波浪场的分布具有显著不同的特征,同时验证了模型在该海域有较好的适用性。徐丽丽等^[19]基于WRF (Weather Research and Forecasting Model)海面风场预报模型,利用结构网格海浪模型WAVEWATCH III和非结构网格海浪模型SWAN的嵌套计算,建立了适用于东海海区和上海近海的海浪数值预报系统。通过不同的数值实验,证明了此系统的稳定性和时效性。结果表明对于近岸区域采取嵌套计算的SWAN模型预报结果的精度比WAVEWATCH III模型预报结果的精度显著提高。

1.2.3 福建沿岸及台湾海峡海浪模拟的研究

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.